

CARACTERIZACIÓN DE LA RESPONSABILIDAD ESPECTRAL DE LEDs COMO DETECTORES ÓPTICOS EN EL ALCANCE DE 20°C A 75°C.

Matías L. Arroyo Camacho*, Wolfgang A. Schmid**, Juan C. Molina Vázquez**,
Martha Rosete Aguilar*, Ilse Ruiz Mercado*

*CCADET, UNAM, Cd. Universitaria, México, D.F. C.P. 04510.

52 (55) 5622 8602 ext. 1125, 52 (55) 5622 8651 y satamle@yahoo.com.mx,
martha@aleph.cinstrum.unam.mx, ilse@berkeley.edu

**CENAM, km 4.5, carretera a los Cués, El Marqués, Qro. C.P. 76241.
52 (442) 211 0500 ext. 3342 / 33xx, wschmid@cenam.mx, jcmolina@cenam.mx

Resumen: En el presente trabajo se presentan las mediciones de responsividad espectral para cuatro diodos emisores de luz, LEDs, como detectores ópticos. Dos LEDs detectan en la región visible, 645nm, y los otros dos LEDs en la región del cercano infrarrojo, IR, 842nm y 916nm. Asimismo se presentan resultados de la responsividad espectral relativa de los LEDs como función de la temperatura en un alcance de 20°C a 75°C y se concluye con algunas consideraciones para posibles aplicaciones de los LEDs en radiómetros.

1. INTRODUCCIÓN

Los diodos emisores de luz (LEDs) son convencionalmente utilizados como fuentes luminosas aproximadamente monocromáticas, ofreciendo las ventajas de ser compactas, durables y económicas. Debido a que la unión semiconductor que integra estos diodos puede a su vez producir una fotocorriente cuando se hace incidir luz sobre ella, los LEDs pueden ser también utilizados como detectores. Utilizados como fotodiodos, los LEDs constituyen detectores espectralmente selectivos.

En 1974 Volz [1] propuso el uso de filtros de interferencia y de fotodiodos de silicio operados en modo fotovoltaico, como detectores espectralmente selectivos para la construcción de un fotómetro solar manual, portátil y económico. En 1994 Mims [2] propuso sustituir con LEDs los fotodiodos de Silicio y los filtros de interferencia utilizados en el fotómetro de Volz, obteniendo resultados satisfactorios en la obtención de parámetros atmosféricos[3,4]. Existen referencias de trabajos aislados en donde se han utilizado los LEDs como detectores para caracterización de pulsos ultracortos [5] y colorimetría [6]. En ninguna de las referencias antes mencionadas se ha realizado un estudio amplio que caracterice a los LEDs como detectores en su respuesta espectral y como varía ésta con la temperatura.

En el presente trabajo se realiza este tipo de caracterización para cuatro modelos de LEDs, dos en la región del visible y dos en la región del IR.

2. SISTEMA DE MEDICIÓN

La medición de la responsividad espectral de los LEDs se realizó mediante el método de sustitución, exponiendo el LED y un fotodiodo patrón de silicio a la misma iluminación monocromática de longitud de onda λ . Con un detector auxiliar y el uso de un divisor de haz se monitorea la potencia óptica del haz durante el proceso de comparación, lo cual permite corregir errores por derivas de la potencia óptica. La responsividad espectral $s_{LED}(\lambda)$ del LED se obtiene por:

$$s_{LED}(\lambda) = \frac{I_{LED}(\lambda)}{I_{patron}(\lambda)} \cdot \frac{M_{patron}(\lambda)}{M_{LED}(\lambda)} \cdot s_{patron}(\lambda) \quad (1)$$

donde $I_{LED}(\lambda)$ es la fotocorriente generada en el LED, $I_{patron}(\lambda)$ es la fotocorriente del detector patrón y $s_{patron}(\lambda)$ su responsividad espectral (para irradiancia). $M_{LED}(\lambda)$ y $M_{patron}(\lambda)$ son las señales del detector de monitoreo en el momento de la medición con el LED y el detector patrón, respectivamente. Los LEDs se midieron en el modo fotoampérico utilizando un amplificador de transimpedancia.

El sistema de medición [7] está constituido por una fuente sintonizable de luz (lámpara incandescente + monocromador doble, configuración Czerny-Turner) y componentes auxiliares para generar una iluminación directa o difusa de los detectores, componentes para el posicionamiento de los detectores y para la medición de las señales. Se midieron los LEDs tanto con iluminación directa como con difusa. Para la medición con iluminación

directa, el LED y el detector patrón se exponen en forma alterna a una iluminación completa y homogénea. Para la medición con iluminación difusa, se conecta a la salida del monocromador una esfera integradora y se montan el LED y el detector patrón en dos puertos de la esfera en posición opuesta, con el objetivo de generar condiciones de iluminación iguales en los dos detectores. Debido a la medición casi-simultánea en este caso, no se requiere un detector de monitoreo. La configuración de iluminación directa permite un calentamiento del LED, montándolo en un cilindro de aluminio al que se le enreda un resistor eléctrico de 600Ω para calentarlo [8]. Se logra una estabilidad de ±1°C en un alcance de 20°C a 120°C.

La incertidumbre de las mediciones de la responsividad espectral está en el orden del 1% (k=2), pero se incrementa en el extremo “rojo” del espectro debido al alto coeficiente de temperatura de los LEDs.

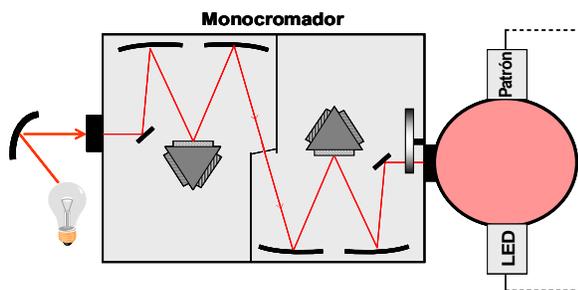
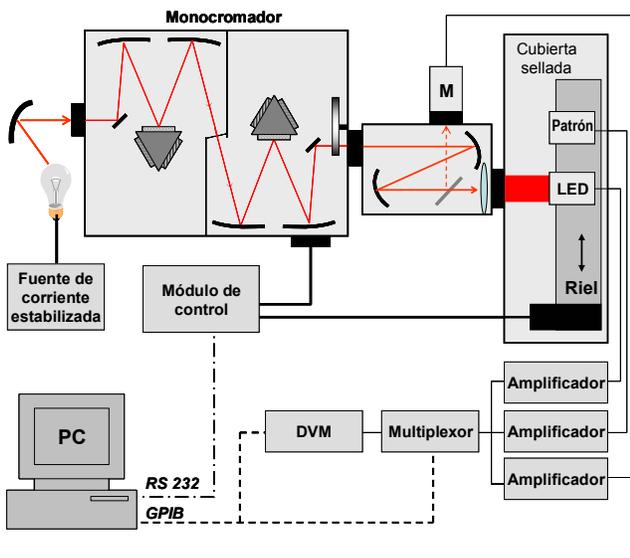


Fig. 1: Sistema de medición para iluminación directa (arriba) y difusa (abajo).

3. RESULTADOS

Se analizaron dos LEDs difusos con emisión en el visible: (A) SMF-HM1530SRD-509, de Lumex compuesto de GaAlAs, que emite a una longitud de onda pico $\lambda_{pico} = 660\text{nm}$, y (B) HLMP-D101 de Agilent, compuesto por AlGaAs, emitiendo a $\lambda_{pico} = 645\text{nm}$, ambos con un ancho de banda de 20nm. Además se analizaron dos LED's que emiten en el infrarrojo: (C) CQX15 F240, de Fairchild semiconductors, compuesto por GaAs emitiendo a $\lambda_{pico} = 940\text{nm}$ y (D) F5E1 F348, de Fairchild semiconductors, compuesto por AlGaAs, emitiendo a $\lambda_{pico} = 880\text{nm}$, con un ancho de banda de 75nm.

Para cada modelo de LED se presenta un conjunto de cuatro gráficas. En el orden de arriba hacia abajo las gráficas muestran:

- (a) La responsividad espectral relativa para varios LEDs con iluminación difusa, con el objeto de mostrar la reproducibilidad entre distintos LEDs de un mismo modelo.
- (b) La comparación relativa entre la responsividad espectral para iluminación difusa y directa. En el caso de los LEDs que trabajan en el visible se ha incluido el espectro de emisión el cual fue medido con un espectroradiómetro portátil. Para los LEDs del IR no fue posible obtener los espectros de emisión.
- (c) Su responsividad espectral absoluta a diferentes temperaturas, obtenida con iluminación directa.
- (d) Los coeficientes de temperatura relativos:

$$C_{T-rel} = \frac{s(T_2) - s(T_1)}{(s(T_2) + s(T_1))/2} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

En la tabla 1 se resume la información obtenida de las gráficas anteriores: tipo de iluminación, temperatura, longitud de onda pico, λ_P , que es la longitud de onda para la cual la responsividad espectral es máxima, ancho de banda, $\Delta\lambda$, (FWHM) y la longitud de onda dominante λ_D :

$$\lambda_D = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} s(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} s(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (3)$$

Se incluyen las señales calculadas, A_{solar} y A_{plano} que el LED mediría cuando se le ilumina con una irradiancia constante E_0 (“espectro plano”) y el espectro solar a nivel del mar, $E_{solar}(\lambda)$:

$$A_{solar} = \int_{-\infty}^{\infty} s(\lambda) E_{solar}(\lambda) d\lambda \quad A_{plano} = \int_{-\infty}^{\infty} s(\lambda) E_0 d\lambda \quad (4)$$

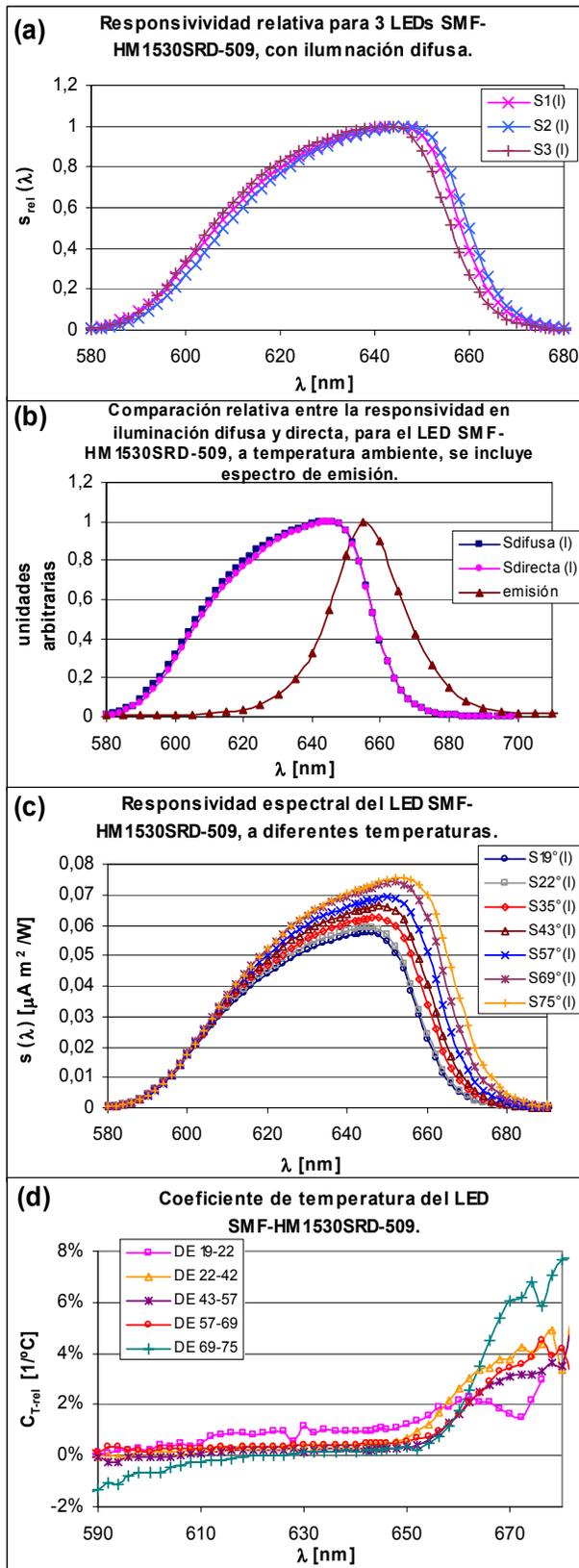


Fig. 2: Resultados del LED SMF-HM1530SRD-509

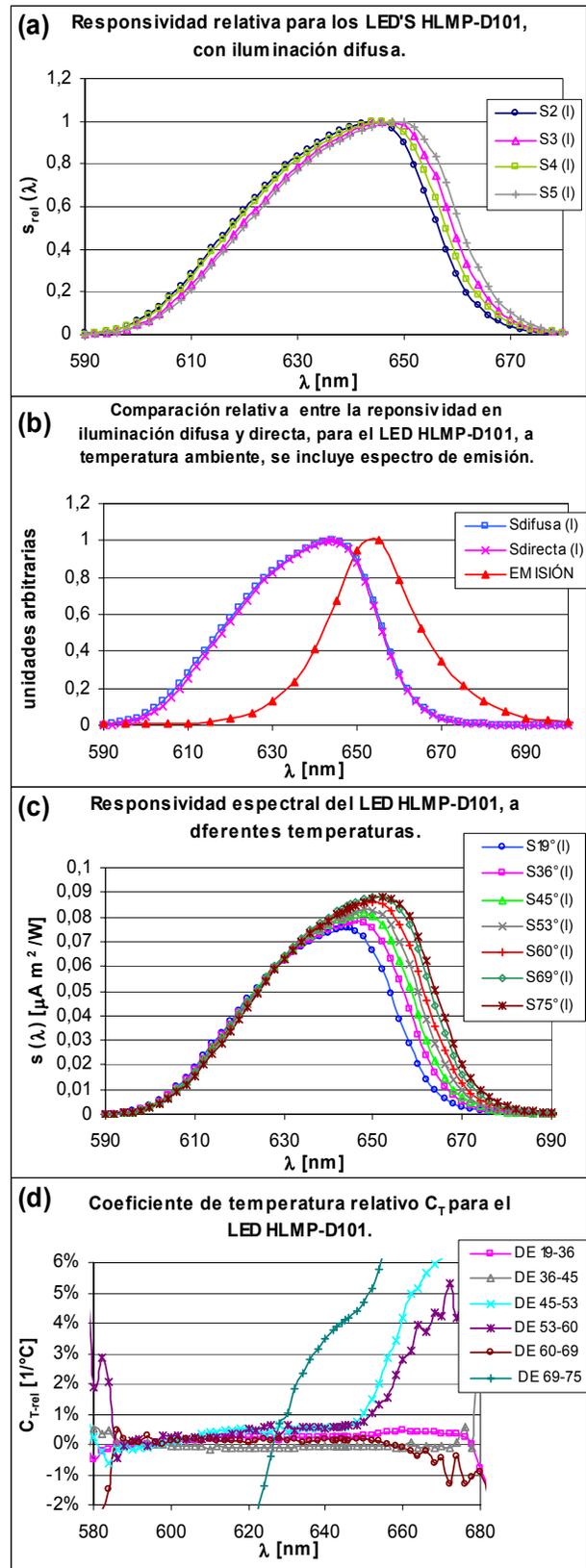


Fig. 3: Resultados del LED HLMP-D101

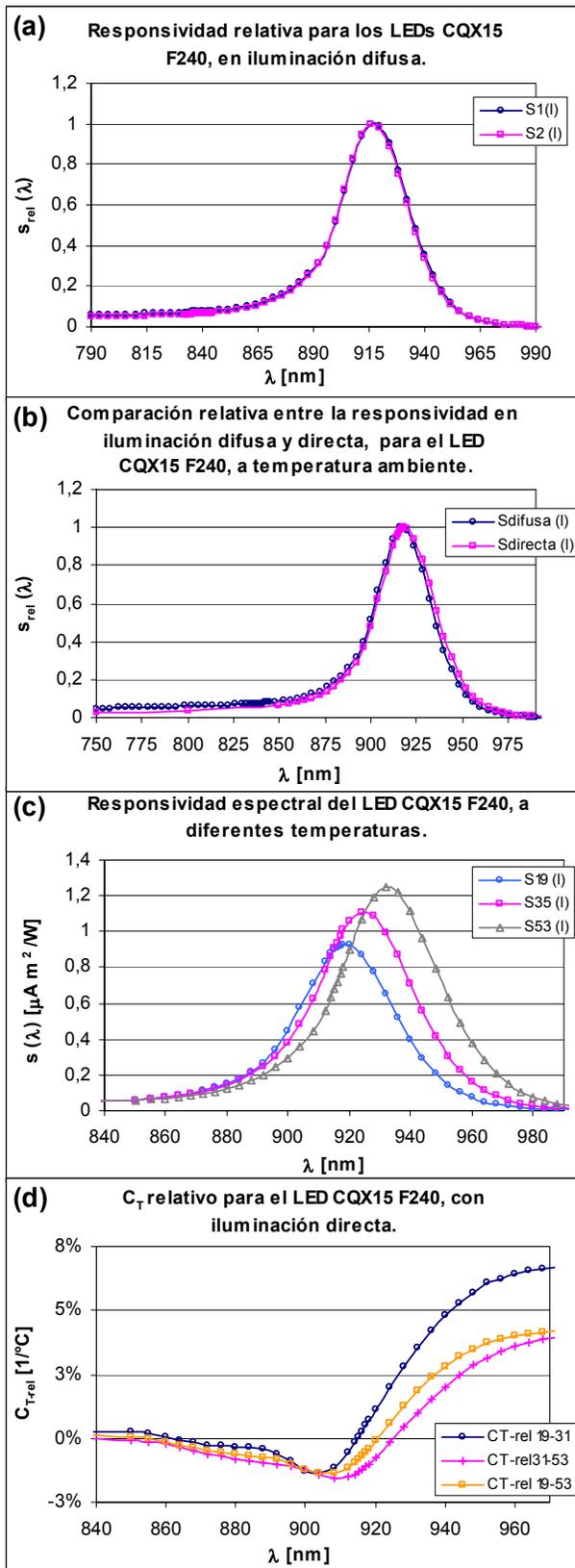


Fig. 4: Resultados del LED CQX15 F240

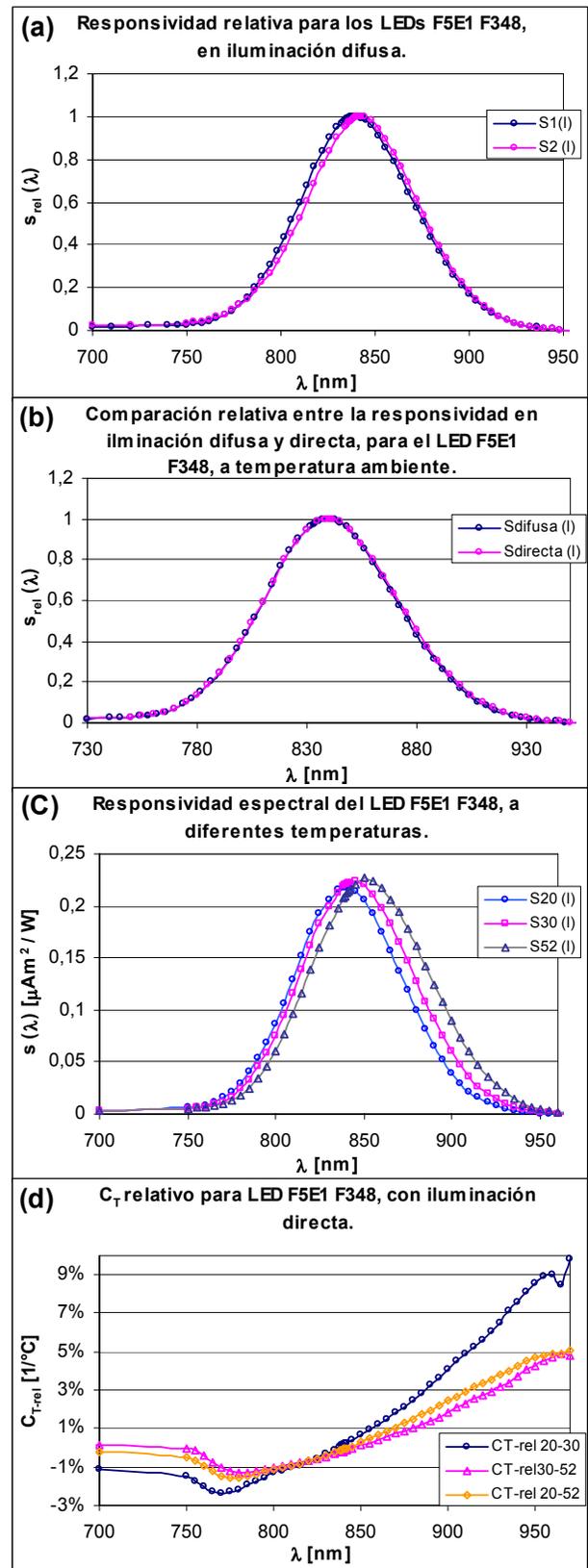


Fig. 5: Resultados del LED F5E1 F348

LED	TIPO DE ILUMINACIÓN	TEMP. (°C)	λ_p [nm]	λ_D [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	Esp. solar A_{solar} [μ A]	Esp. plano A_{plano} [μ A]
SMF-HM1530 SRD-509	DIFUSA	21	644	631,32	51	---	---
	DIRECTA	19	646	632,44	50	3,991	3,991
	DIRECTA	21	646	632,63	50	4,141	4,141
	DIRECTA	22	646	632,66	50	4,112	4,113
	DIRECTA	35	648	633,92	52	4,446	4,454
	DIRECTA	42	648	634,87	54	4,729	4,743
	DIRECTA	43	648	634,77	54	4,752	4,766
	DIRECTA	57	650	636,07	54	5,094	5,117
	DIRECTA	69	652	637,39	56	5,552	5,588
DIRECTA	75	654	638,78	58	5,789	5,839	
HLMP-D101	DIFUSA	21	645	637,00	40	---	---
	DIRECTA	19	644	636,52	38	4,019	4,019
	DIRECTA	36	646	638,32	38	4,321	4,331
	DIRECTA	45	648	639,21	40	4,565	4,582
	DIRECTA	53	648	640,27	42	4,727	4,752
	DIRECTA	60	650	641,07	40	4,967	4,999
	DIRECTA	69	652	642,06	42	5,197	5,238
	DIRECTA	75	652	642,87	44	5,230	5,278
CQX15 F240	DIFUSA	21	916	865,39	36	---	---
	DIRECTA	19	918	888,64	36	37,464	37,464
	DIRECTA	35	924	898,69	36	41,623	44,559
	DIRECTA	53	932	907,39	38	43,975	50,425
F5E1 F348	DIFUSA	21	842	831,86	68	---	---
	DIRECTA	20	840	835,33	70	16,410	16,410
	DIRECTA	30	845	841,49	75	17,192	17,382
	DIRECTA	52	850	848,65	80	18,009	18,382

Tabla 1. Resultados experimentales de los LEDs como detectores ópticos.

4. DISCUSIÓN

Respecto a la forma de la responsividad espectral y su variación con la temperatura, los LEDs muestran un comportamiento muy similar al de los fotodiodos convencionales:

Su responsividad espectral se incrementa con la longitud de onda ("rama de pendiente positiva") hasta un límite λ_p , después cae rápidamente a cero ("rama de decaimiento"). A diferencia de los fotodiodos convencionales, la responsividad está limitada a un alcance espectral relativamente estrecho. Este truncamiento en la rama de pendiente positiva puede ser una consecuencia de la absorción del encapsulado en este alcance espectral. Pruebas con LEDs en los cuales se quitó (limando) una parte del encapsulado muestran un ensanchamiento de la responsividad espectral hacia longitudes de onda cortas, lo que respalda esta interpretación.

Este efecto es menos pronunciado para los LEDs del IR - su responsividad no cae a cero como en el caso de los LEDs del visible. La señal que mide el CQX15-F240 a 19°C entre 400nm y 850nm es de 8,4 μ A que es aproximadamente el 22% de la señal total cuando se integra para el espectro solar. Para el F5E1-F348 en IR, la señal entre 400nm y 750nm es de 0,93 μ A que resulta del 6% de la señal total.

Un incremento de la temperatura resulta en un corrimiento al rojo de la rama de decaimiento de la responsividad espectral, mientras la rama de pendiente positiva se ve muy poco afectada (ver gráficas (c)). La consecuencia es un corrimiento al rojo de λ_p , un incremento de $s_{max} = s(\lambda_p)$ y un incremento de la responsividad integral, o sea de las señales A_{solar} y A_{plano} . Este comportamiento también se manifiesta en las gráficas identificadas con (d) que muestran el coeficiente de temperatura relativo.

En equivalencia a un fotodiodo convencional este comportamiento puede ser interpretado como que la responsividad espectral se está incrementando hacia longitudes de onda mayores, hasta un límite λ_p , a partir del cual la energía fotónica hc/λ_p sea similar o menor a la energía de la banda prohibida (“band-gap”) E_{gap} del semiconductor y ya no alcanza para excitar electrones de la banda de valencia a la banda de conducción. Un incremento de la temperatura disminuye E_{gap} – un efecto conocido en semiconductores – y resulta en los corrimientos al rojo de λ_p y de la rama de decaimiento.

Como resultados adicionales importantes hay que resaltar que no se observa una diferencia significativa en la responsividad espectral relativa entre iluminación directa y difusa (gráficas (c)) y que hay una buena reproducibilidad entre LEDs del mismo tipo (gráficas (a)).

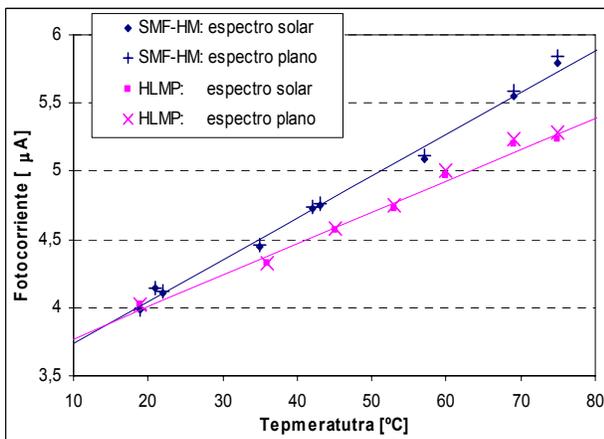


Fig. 6: Incremento de la fotocorriente integral A_{solar} y A_{plano} con la temperatura en los LEDs del visible. De los ajustes lineales resultan los coeficientes de temperatura (SMF-HM: $C_T = 0,031 \mu A/^{\circ}C$; HLMP: $C_T = 0,023 \mu A/^{\circ}C$)

5. CONCLUSIONES

Los resultados permiten algunas consideraciones del uso de LEDs como detectores en radiómetros:

Muestran una selectividad espectral en el orden de 40nm a 80nm que para muchas aplicaciones resulta apropiada. El hecho de que los LEDs funcionen como filtros espectrales y como detectores es de suma importancia debido a que el costo de un LED es menor al 1% del costo de un fotodiodo y un filtro de interferencia. En particular en radiometría solar,

los resultados experimentales obtenidos con fotómetros solares, construidos con filtros de absorción con un ancho de banda medio de 60nm FWHW en el visible y filtros de interferencia de 35nm FWHW en el IR, han sido satisfactorios [1]. Asimismo los fotómetros solares basados en LEDs con anchos de banda medio entre 60nm y 80nm FWHW, han mostrado ser satisfactorios [2-4]. Por lo que los LEDs en el visible caracterizados en este trabajo son adecuados para esta aplicación. Para los LEDs en el IR se deberá tener más cuidado ya que el ensanchamiento de la responsividad espectral es más pronunciado que para los LEDs visibles.

Por otro lado, las fotocorrientes generadas son suficientemente altas para no presentar problemas en su medición, incluso en aplicaciones de campo.

El punto crítico en aplicaciones de campo puede ser la variación de la temperatura ambiental y la consecuente variación de la señal integral generada (ver figura 6) con coeficientes de temperatura relativos en el orden de 0,5%/°C. Sin embargo, mediante correcciones numéricas de las mediciones o mejor aun, una estabilización del radiómetro en temperatura (p. ej. a temperaturas elevadas de 50°C o 60°C) este problema puede ser resuelto sin mayores complicaciones. Por sus características como detectores y su bajo precio, los LEDs parecen ser candidatos interesantes para aplicaciones en radiómetros solares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a Irma Oidor por la medición de los espectros de emisión.

REFERENCIAS

[1] Volz, F.E., “Economical multispectral Sun photometer for measurements of aerosol extinction from 0.44 microns to 1.6 microns and precipitable water”, Appl. Opt., 13, 1732-1733, (1974).
 [2] Mims, F.M. III. Sun photometer with light-emitting diodes as spectrally selective detectors”, Appl. Opt. 31, 6965-6967, (1992).
 [3] Brooks, D.R., Mims, F.M., “Development of an inexpensive handheld LED-based Sun photometer for the GLOBE Program”, J. Geophys. Res., 106, D5, 4733-4740, (2001).

- [4] Ruiz, M. Ilse, "Radiómetros solares que usan LEDs como detectores", reporte de la estancia de investigación realizada en el Optical Sciences Center de la Universidad de Arizona, Junio-Diciembre, (2001).
- [5] Reid, D.T., et. al. "Light emitting diodes as measurements devices for femtosecond laser pulses", Optics Letters, 22, No. 4, 233-235, (1997).
- [6] Berry, R. J., et. al. "Light emitting diodes as sensors for colorimetric analyses", Appl. Spectroscopy, 51, No. 10, 1521-1524, (1997).
- [7] W. A. Schmid, J. C. Molina Vázquez, "La escala de la responsividad espectral de detectores ópticos realizada en el CENAM", SOMI XVII Congreso de Instrum, Ing. Optica (2003).
- [8] M.Rosete-Aguilar, I. Ruiz-Mercado, F. Reygadas, R.Velasco-Segura, Z.Trejo y L. Erantzcani, "Caracterización espectral, angular y térmica de diodos emisores de luz como detectores ópticos", XLVI Congreso Nacional SMF/XVI Reunión Anual AMO, pp. 10V03-1, 10V03-10, (2003).